

Distancia de visibilidad en carreteras: influencia de Modelos Digitales de Elevaciones y elementos de las márgenes

César de Santos-Berbel

Doctorando, Universidad Politécnica de Madrid, España

María Castro Malpica

Profesora Titular, Universidad Politécnica de Madrid, España

Serafín López-Cuervo Medina

Profesor Asociado, Universidad Politécnica de Madrid, España

María Paréns-González

Investigadora, Universidad Politécnica de Madrid, España

RESUMEN

La distancia de visibilidad juega un papel importante en la seguridad vial de la las carreteras. Se pueden emplear dos clases de modelos digitales de elevaciones (MDE) en el cálculo de la visibilidad disponible en carreteras: modelos digitales del terreno (MDT) y modelos digitales de superficie (MDS). Los MDT, que representan la superficie del terreno sin vegetación, se suelen utilizar para calcular la distancia de visibilidad disponible en fase de proyecto de la carretera. Por otra parte, el empleo de MDS proporciona información adicional acerca de los elementos de las márgenes, tales como árboles, construcciones, muros o incluso señales de tráfico que pueden reducir la distancia de visibilidad disponible. Este documento analiza la influencia del empleo de tres tipos de MDE en el cálculo de la distancia de visibilidad disponible. Para ello se han estudiado carreteras de distintas características de la Comunidad de Madrid (España) utilizando una aplicación informática basada en sistemas de información geográfica. El estudio realizado pone de manifiesto la influencia del tipo de MDE en los resultados de distancia de visibilidad, así como los pros y contras de la utilización de dichos modelos.

1. INTRODUCCIÓN

Para llevar a cabo de manera satisfactoria todas las posibles maniobras que conlleva la conducción, un conductor deberá contar, entre otros factores, con una distancia de visibilidad suficiente en cada momento. Las diferentes maniobras inherentes a la conducción, tales como detención, sortear un obstáculo, adelantamiento o incorporación a la vía, requieren un cierto espacio para que puedan ser efectuadas de manera eficaz y segura. En respuesta a este hecho, las directrices de diseño geométrico de carreteras de distintos países establecen valores mínimos de distancia de visibilidad para cada una de esas maniobras dependiendo de la velocidad de proyecto (Ministerio de Fomento 2000; AASHTO, 2004; FGSV, 2012).

Debido a su estrecha relación con la seguridad vial, los estudios de distancia de visibilidad disponible en una carretera no sólo deben efectuarse durante el proyecto de la misma sino también durante la explotación, ya que las condiciones, tanto de la propia carretera como las del entorno, pueden haber variado. En ocasiones no hay datos disponibles o veraces sobre la geometría de la carretera tal y como es, bien sea porque no se ha construido exactamente de acuerdo con lo proyectado o por que se haya modificado la geometría de la vía posteriormente. Por otra parte, pueden haber aparecido elementos junto a la carretera tales como construcciones o vegetación tras la ejecución del proyecto que obstruyan el campo visual del conductor. Además, los elementos funcionales de la propia carretera (como por ejemplo, señalización y barreras) también podrían influir en la visibilidad.

Para calcular la distancia de visibilidad, que se mide sobre la trayectoria teórica que recorre un vehículo, es necesario contar tanto con dicha trayectoria a lo largo del tramo de estudio como con un modelo que represente la superficie de la carretera y su entorno. Por otra parte, la altura a la que se sitúan el observador y el hipotético obstáculo a visualizar son dos parámetros que deben ser fijados.

Para representar la superficie de la carretera y su entorno se emplean modelos digitales de elevaciones (MDE). Hay dos clases de MDE que pueden ser empleados en el cálculo de la visibilidad disponible en carreteras: modelos digitales del terreno (MDT) y modelos digitales de superficie (MDS). Los MDT se suelen utilizar para calcular la distancia de visibilidad disponible en fase de proyecto de la carretera. Por otra parte, el empleo de MDS proporciona información adicional acerca de los elementos de las márgenes que pueden reducir la distancia de visibilidad disponible. No obstante, las características intrínsecas de los distintos tipos de MDS dificultan el análisis de la distancia de visibilidad por parte de herramientas que no permitan que dos puntos sobre su superficie tengan la misma proyección en planta y distinta cota. Este hecho dificulta la representación de elementos en voladizo, siendo especialmente problemático cuando se encuentran emplazados parcialmente por encima de la calzada, como ocurre con las copas de los árboles o señalización tipo banderola.

El objetivo de este documento es analizar la influencia del empleo de cada tipo de MDE en el cálculo de la distancia de visibilidad disponible, contrastando los resultados que arroja cada uno de ellos.

2. ANTECEDENTES

Con objeto de facilitar el diseño geométrico de las carreteras, la norma española de trazado (Ministerio de Fomento, 2000), entre otras, propone una metodología analítica en dos dimensiones para el cálculo de la distancia de visibilidad disponible. No obstante, este tipo de procedimientos no resultan prácticos puesto que consideran de manera desacoplada planta y alzado, lo que puede llevar a sobreestimar o subestimar la distancia de visibilidad

realmente disponible (Hassan, Easa y Abd El Halim, 1997). En su lugar, es más común el empleo de MDE y algoritmos basados en visuales reiteradas para realizar esta tarea operando en tres dimensiones. Estos procedimientos analizan el perfil del terreno bajo la línea de visión entre un observador y un objeto, determinando si la visual es interceptada por el terreno y por tanto si el objeto es visible o no (Kidner, Sparkes, Dorey, Ware y Jones, 2001). Además de los algoritmos que utilizan visuales reiteradas, se pueden considerar procedimientos basados en cuencas visuales también empleados en el cálculo de distancias de visibilidad (Castro, Iglesias, Sánchez y Ambrosio, 2011; Jha, Karri y Kühn, 2011). En cuanto a la relación entre la presencia de elementos en las márgenes de carreteras y la visibilidad, Ismail y Sayed (2007) han estudiado la influencia de las barreras de seguridad de hormigón en la distancia de visibilidad cuando se disponen en la mediana.

Las aplicaciones informáticas de diseño de carreteras calculan las distancias de visibilidad disponible y las comparan con las necesarias para efectuar determinadas maniobras. Además, disponen de herramientas de visualización que simulan la vista en perspectiva que tendría un conductor en cada momento al recorrer la vía (Kühn, Volker y Kubik, 2011; Castro, 2012). Dichas herramientas de visualización se utilizan para supervisar la coordinación tridimensional del trazado, pero requieren que el análisis lo realicen ingenieros experimentados (Larocca, da Cruz, Quintanilha y Kabbach, 2011).

Por otra parte, los métodos basados en visuales reiteradas permiten elaborar diagramas de visibilidad (gráficos que representan en el eje de abscisas las sucesivas posiciones de un observador que recorre la carretera y en el eje de ordenadas la visibilidad disponible desde cada posición) (Kühn y Jha 2011; Castro, Anta, Iglesias y Sánchez, 2013). El estudio de la distancia de visibilidad disponible a lo largo de la trayectoria de un vehículo mediante diagramas de visibilidad sirve para establecer comparaciones con la distancia de visibilidad requerida, evaluar la coordinación tridimensional del trazado (Roos y Zimmermann 2004; Jha, Karri y Kühn, 2011; Castro, Anta, Iglesias y Sánchez, 2013) o evaluar la consistencia del trazado de las carreteras (Altamira, Marcet, Graffigna y Gómez, 2010). La Sociedad Alemana de Investigación sobre las Carreteras y el Transporte cuenta con unas directrices que regulan tanto en materia de generación de imágenes virtuales como en el análisis de diagramas de visibilidad (FGSV, 2008).

Se ha investigado acerca de los efectos que produce una distancia de visibilidad insuficiente sobre la seguridad vial (Olson, Cleveland, Fancher y Kostyniuk, 1984; Fink y Krammes, 1995; Fambro, Fitzpatrick y Koppa. 1997; Andueza 2000; Caliendo, Guida y Parisi, 2007). La frecuencia de colisión resulta estar correlacionada negativamente con la distancia de visibilidad disponible (Sparks, 1968; Sylianov, 1973; Urbanik II, Hinshaw y Fambro, 1989).

Los MDE son representaciones tridimensionales de la superficie de un terreno. Cada vez se emplea más la tecnología *Light Detection And Ranging* (LIDAR) para efectuar la toma de

datos de los puntos de dicha superficie. Se pueden diferenciar dos grandes clases de MDE: modelos digitales del terreno (MDT) y modelos digitales de superficie (MDS). Los MDT, que representan la superficie del terreno al desnudo, se utilizan en el proyecto de carreteras no sólo para estimar los movimientos de tierra y estudios hidrológicos sino también para calcular la distancia de visibilidad disponible. Los MDS se han usado habitualmente en el modelado de paisajes, ajustándose a la realidad de la carretera y su entorno, en principio, mejor que los MDT. Khattak y Shamayleh (2005) han utilizado MDS para estimar la distancia de visibilidad disponible en carreteras. Por otra parte, la toma de datos con tecnología LIDAR para elaborar MDE en carreteras se suele efectuar a partir de dos técnicas distintas: mediante un vuelo (avión provisto de LIDAR) (Figura 1) o a partir de un vehículo (también provisto de LIDAR) que recorra el vial.

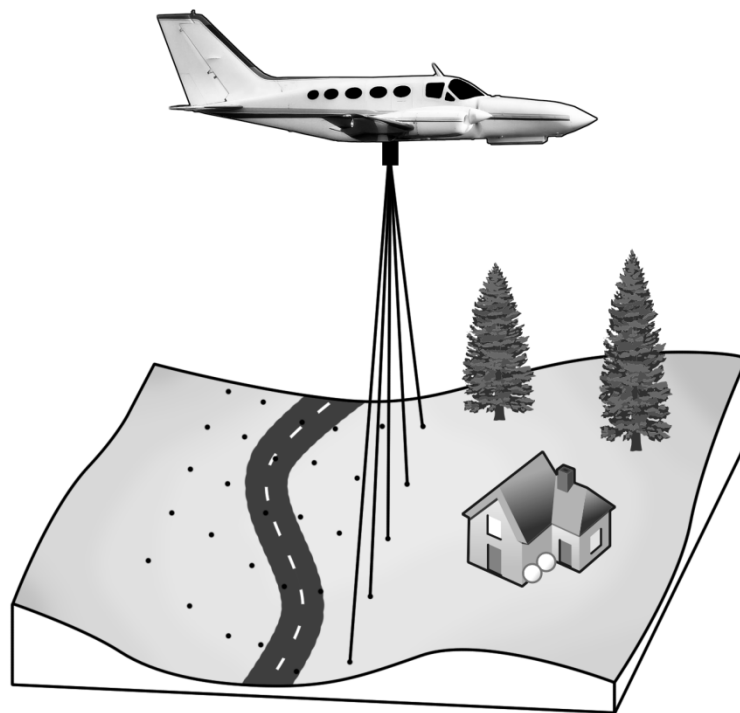


Fig. 1 – Esquema de la toma de datos con LIDAR aerotransportado

Por otra parte, en el caso de los sistemas de información geográfica (SIG) los MDE son representados por redes de triángulos irregulares que satisfacen el criterio de Delaunay al proyectarlos horizontalmente (Esri, 2008). En su construcción, se parte de la proyección de los puntos sobre el plano para formar la superficie, vértices a los que después se asigna la cota. Se crean así superficies poliédricas abiertas, formadas por triángulos adyacentes sin solapamiento en planta, de modo que no es posible que dos puntos sobre la superficie del modelo tengan la misma proyección en planta y cota diferente. Mientras que el problema de la triangulación de Delaunay es resoluble en todo caso cuando el espacio es bidimensional, no es siempre posible resolver el problema correspondiente en tres dimensiones con el mismo rigor matemático (George y Borouchaki, 1998). Hanusch (2010) se refiere a estas técnicas de análisis de visibilidad con MDE como 2,5D. Como alternativa a los algoritmos de estudio de visibilidad basados en análisis de perfiles del

terreno, Hanusch (2010) propone un análisis tridimensional integral mediante el estudio de superposición en la visualización entre los triángulos que representan una superficie, determinando qué partes son visibles y cuáles no.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Modelos digitales de elevación

En los estudios realizados se han empleado tres tipos de MDE diferentes. Un MDT obtenido con LIDAR aerotransportado con paso de malla ortogonal constante (MDT); un MDS también obtenido con LIDAR aéreo y paso de malla ortogonal constante (MDS); un MDS obtenido mediante sensores LIDAR a bordo de un vehículo que circula por el tramo en estudio y con una distribución irregular de puntos, denominado *Mobile Mapping System* (MMS). Los modelos elaborados mediante dispositivo aerotransportado no han sido programados *ex profeso* para este estudio sino que son los modelos de uso genérico disponibles para cualquier fin. En varias de las carreteras estudiadas, se trata de los modelos con paso de malla 1 metro, creados por el Instituto Geográfico Nacional dentro del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) (Ministerio de Fomento, 2010). En otra de las carreteras estudiadas, el paso de malla de los modelos elaborados gracias a LIDAR aéreo es de 2,5 metros.

La malla de puntos del MDS MMS es diferente a las dos anteriores. Se ha obtenido mediante el *Mobile Mapping System* IPS2-Compact de Topcon (Topcon, 2007). El equipo captura puntos 3-D del entorno mediante equipos láser-escáner. Estos dispositivos están colocados sobre el vehículo de tal forma que el haz abarca la carretera y gran parte de sus márgenes: dos láseres orientados hacia los laterales de la plataforma y un láser orientado hacia el suelo desde la parte trasera del vehículo. Los tres láseres escáner capturan 120000 puntos/segundo. Empleándose el resto de componentes del sistema para situar y orientar el levantamiento; el GNSS establece posición geoespacial, el IMU la orientación y el odómetro la distancia recorrida, velocidad y ángulo de giro de las ruedas del vehículo. La velocidad del vehículo de toma de datos fue, aproximadamente, de 50 km/h, obteniéndose perfiles láser, separados aproximadamente 15 cm en la dirección longitudinal de la carretera. En sentido transversal al eje de la carretera, la distribución de los puntos es más regular cuanto más cerca están los puntos del sensor LIDAR, mientras que la malla se vuelve más irregular y los puntos obtenidos están más separados entre sí a medida que aumenta la distancia con respecto al sensor. Con todo esto, el modelo obtenido posee una densidad de puntos mucho mayor y es más rico en detalles que los modelos obtenidos con LIDAR aerotransportado.

Debido a las diferentes características de cada tipo de MDE, puede suceder que se produzcan resultados significativamente distintos en estudios de visibilidad para un mismo vial. El empleo de MDS proporciona información adicional acerca de los elementos de las márgenes, cuya influencia en la visibilidad se desea estudiar. Por consiguiente, elementos

tales como árboles, construcciones, muros o incluso señales de tráfico se tienen en cuenta para el análisis. No obstante, las características intrínsecas de los MDS complican la interpretación de los resultados, dificultando por tanto el análisis de la distancia de visibilidad.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, el uso de MDS conlleva ciertas dificultades a la hora de representar elementos con huecos pasantes o que “vuelan”, y resultan especialmente problemáticos si se encuentran parcialmente sobre la calzada, como ocurre por ejemplo en el caso de copas de árboles o señalización tipo banderola. En estos casos se ha llevado a cabo un procesado de puntos, suprimiendo o modificando el atributo de cota en todos aquellos que, quedando en planta dentro de la zona correspondiente a la calzada de la carretera, su cota no se corresponde con la de un punto del pavimento. En el caso del MDS MMS, al tratarse de un modelo de alta resolución, hay numerosos elementos que se capturan durante la toma de datos que deben ser filtrados. Es el caso, por ejemplo, de cables de tendido eléctrico, vehículos que circulan durante la toma de datos o incluso fauna (aves). Normalmente los puntos que suponen ruido pueden eliminarse directamente sin suponer una pérdida sustancial de información, gracias a la elevada resolución de estos modelos. Sin embargo, como el barrido se realiza desde la carretera, la densidad de puntos es menor cuanto más lejos están de la carretera y podría haber zonas con influencia en la visibilidad donde los datos no sean suficientes para modelarlas o los propios elementos de las márgenes podrían crear zonas de sombra sin puntos.

3.2 Carreteras estudiadas

Se ha analizado la distancia de visibilidad disponible en cuatro tramos de carretera, contabilizando una longitud total de 56 km (Tabla 1). Se trata de carreteras interurbanas de calzada única y doble sentido de circulación, situadas en la Comunidad Autónoma de Madrid. El estudio de la visibilidad disponible se ha llevado a cabo para ambos sentidos de circulación. Tres de estas carreteras discurren por terreno ondulado mientras que la restante atraviesa un terreno de relieve accidentado. La anchura de plataforma es diferente para cada una de ellas.

| Carretera | MDT | MDS | MDS MMS |
|-----------|-----------|-----------|---------|
| M-221 | MDT01 IGN | | IPS2 |
| M-325 | MDT01 IGN | MDS01 IGN | IPS2 |
| M-607 | MDT2.5 SC | MDS2.5 SC | |
| M-629 | MDT01 IGN | | |

Tabla 1 – MDE utilizados para estudiar la distancia de visibilidad disponible en cada carretera

Los viales estudiados se caracterizan por la abundancia de elementos próximos a las márgenes que pueden influir en la distancia de visibilidad. En estos tramos se han encontrado zonas singulares interesantes para su estudio, provocadas por elementos

cercanos al borde de la calzada.

3.3 Software

El cálculo y análisis de la distancia de visibilidad disponible en carreteras se ha realizado mediante un sistema de información geográfica (SIG). Para ello se ha desarrollado una aplicación informática integrada en un SIG que utiliza un algoritmo basado en visuales reiteradas (Castro, Anta, Iglesias y Sánchez, 2013). Los datos de entrada requeridos por la aplicación son un MDE y la trayectoria del vehículo a lo largo de la carretera (de Santos, Anta, Castro y Paréns, 2013). También es necesario fijar tanto la altura desde la que el observador visualiza la carretera como la altura del obstáculo tipo sobre la calzada. En consonancia con lo dispuesto en la Norma española de Trazado (Ministerio de Fomento, 2000), los valores de dichos parámetros fueron de 1,1 metros para el conductor y 0,2 metros para el obstáculo a visualizar.

Para poder emplear un algoritmo basado en visuales reiteradas, la trayectoria del vehículo se ha considerado de manera discreta, habiéndose establecido estaciones o puntos equiespaciados cada 5 metros, donde se van situando sucesivamente el observador y el obstáculo a visualizar. Desde cada uno de esos puntos donde se ha localizado el observador se comprueba si cada uno de los puntos que quedan delante, donde se sitúa el hipotético obstáculo, es visualizado o si por el contrario, la línea visual es interceptada por la superficie del modelo. Dado que la agudeza visual del ojo humano es limitada, se ha analizado la visibilidad desde cada posición del observador hasta una distancia máxima de 1000 metros.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, se ha observado que, en el caso de tramos rectos, la influencia del tipo de MDE en el resultado de la visibilidad es prácticamente nula. Este hecho se ha constatado en el estudio de la carretera M-325, en la que se han empleado todos los modelos para su análisis.

4.1 Influencia de la vegetación

La vegetación en las márgenes de las carreteras es el elemento que produce una mayor reducción de la distancia de visibilidad disponible, especialmente si se trata de zonas boscosas de densidad media o alta. Este es el caso de las zonas de pinar que atraviesan la carreteras M-325 y M-629. En estas zonas es donde el procesamiento de los puntos que se proyectan sobre la calzada, correspondientes a las copas de los árboles, cobra gran importancia. Dado que la proyección vertical de las copas de los árboles se solapa con la calzada, al construir la triangulación de Delaunay, se crea un abultamiento en la superficie del modelo delante del observador que distorsiona el cálculo de la visibilidad. Es entonces preciso modificar la cota de esos puntos para hacerla corresponder con la de un punto de la calzada. Comparando los resultados arrojados al emplear los diferentes MDE, se observa

que en estas zonas, los valores de distancia de visibilidad que antes eran anormalmente bajos (próximos a cero) son eliminados al realizar el filtrado.

Otro caso particular lo constituye un tramo próximo a un montículo adyacente a la carretera M-607, con árboles y arbustos. En la Figura 2 se representa una captura de la escena real estudiada, donde se indican el promontorio y el tramo de calzada visible a continuación. En este caso no existe el problema del solapamiento de elementos en planta con la calzada, por lo que los MDS realizan una representación mucho más fidedigna del entorno. El promontorio en cuestión provoca una interrupción de la visibilidad, según el resultado obtenido al emplear un MDT, de 45 metros de longitud máxima y que persiste a lo largo de otros 720 metros. Esto puede observarse en la Figura 3, hecho que es representado por la franja delgada diagonal con el sombreado más claro que discurre entre *a* y *b*. No obstante, en el estudio realizado empleando un MDS, al considerar la vegetación, el tramo oculto resulta ser mayor y apenas se observa tramo reaparecido más allá del promontorio, lo que está más en consonancia con la realidad. Como puede comprobarse en la Figura 3, en este tramo las diferencias en los resultados obtenidos utilizando diferentes MDE son significativas no sólo en las distancias de visibilidad disponible, sino también en la longitud de los tramos ocultos y reaparecidos allí donde se producen este tipo de fenómenos.



Fig. 2 – Montículo con tramo oculto y tramo reaparecido en la carretera M-607

4.2 Influencia de elementos funcionales de la carretera

Las dotaciones viarias tales como los elementos de señalización o de protección situados en las márgenes de la carretera también influyen en la distancia de visibilidad disponible. En general, debido a que son elementos fundamentalmente verticales, no son detectados por los equipos aerotransportados y, salvo casos excepcionales de dimensiones considerables, sólo son recogidos por los MDE producidos a partir de toma de datos mediante equipos terrestres (IPS2).

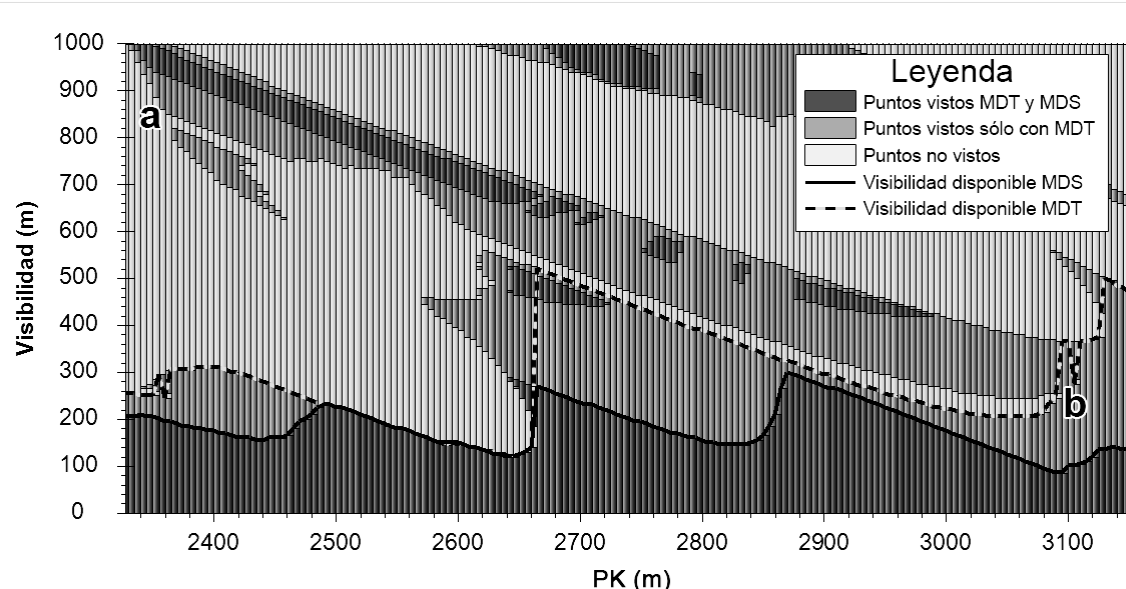


Fig. 3 – Comparación de diagramas de visibilidad obtenidos con MDT y MDS en la carretera M-607

Cabe mencionar el caso un panel luminoso tipo banderola que se encuentra en la carretera M-607 (Figura 4). Debido a su mayor tamaño, este elemento sí aparece representado en el MDS obtenido mediante LIDAR aéreo. En este caso el SIG lo interpreta como un muro que obstruye parte de la calzada, al igual que ocurre con las copas de los árboles o cables de tendido eléctrico que pasan sobre la calzada. En la Figura 5 se muestra como, en el MDS en el que no se han suprimido los puntos del modelo que representan dicha banderola (línea punteada), la visibilidad disponible decrece de manera lineal hasta resultar nula para el PK 11625 (inmediatamente anterior a la posición de la banderola). Esto carece de sentido si se compara con la visibilidad disponible que resulta en el mismo tramo empleando el MDT (línea de trazos). Por este motivo, es imprescindible realizar el procesamiento de los puntos del elemento que en planta se proyectan sobre la carretera, como ya se ha explicado. Una vez procesado el modelo, la visibilidad disponible es la que indica la línea negra continua de la Figura 5, dando lugar a un resultado más realista y en el que prácticamente coinciden las visibilidades del MDT y del MDS procesado.

La presencia de paneles indicadores que se encuentran en el margen de la calzada también influye en los resultados del cálculo de la visibilidad, aunque generan tramos ocultos relativamente cortos (del entorno de 5 ó 10 metros). Su influencia es más notable cuando se encuentran en el lado interior anterior a una curva y/o próximos a un acuerdo vertical cóncavo. Este hecho se observa en los paneles de señalización en el margen de la plataforma de la carretera M-221, cuando fue analizada empleando el MDS MMS. Varios de ellos se emplazan sobre acuerdos verticales convexos, sin apenas influencia sobre la visibilidad y otro, más próximo a un acuerdo vertical cóncavo que sí se deja notar en el diagrama de visibilidad. Pero no sólo los paneles indicadores son detectados en el diagrama de visibilidad. La señal de limitación de velocidad (40 km/h) que se ve a la derecha en la Figura 6 produce la hilera casi vertical de estaciones no visibles en torno al

PK 440 del diagrama de la Figura 7 (indicada con la letra a).



Fig. 4 – Panel luminoso tipo banderola M-607

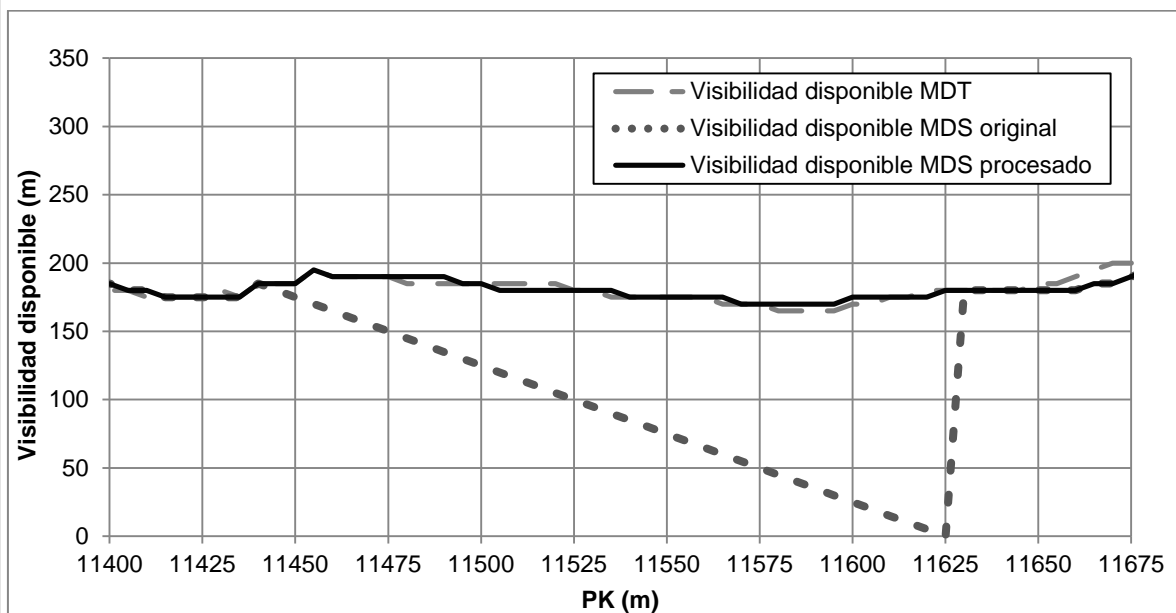


Fig. 5 – Efecto de la presencia del panel luminoso tipo banderola en el diagrama de visibilidad de la carretera M-607

Otro ejemplo de elementos que influyen en los resultados de distancia de visibilidad disponible son las barreras de seguridad metálicas. Puesto que su altura es similar a la del obstáculo tipo, es habitual que, en tramos inmediatamente anteriores a curvas, la visibilidad se vea notablemente reducida en MDS MMS respecto a lo que se obtiene usando MDT. Este hecho se observa en varios tramos de la M-221, vial en el que una gran proporción del trazado dispone de este elemento de seguridad. En la Figura 6 se ha señalado la barrera metálica que produce, como se aprecia en la Figura 7 (entrante

horizontal con sombreado gris medio, indicado con la letra *b*), una reducción de la distancia de visibilidad de aproximadamente 160 metros a lo largo un tramo de 135 metros. Estas diferencias tan abultadas se deben por un lado, a que la altura del obstáculo es muy similar a la altura a la que se encuentra la barrera y por otro, a la longitud del tramo donde se ha colocado el dispositivo. Por tanto, se trata de un elemento con una influencia importante pero muy sensible a los parámetros fijados de inicio, ya que si la altura del obstáculo a visualizar hubiera sido mayor, la disminución de la visibilidad disponible habría sido menor.



Fig. 6 – Elementos de las márgenes que influyen en el estudio de la visibilidad en la carretera M-221.

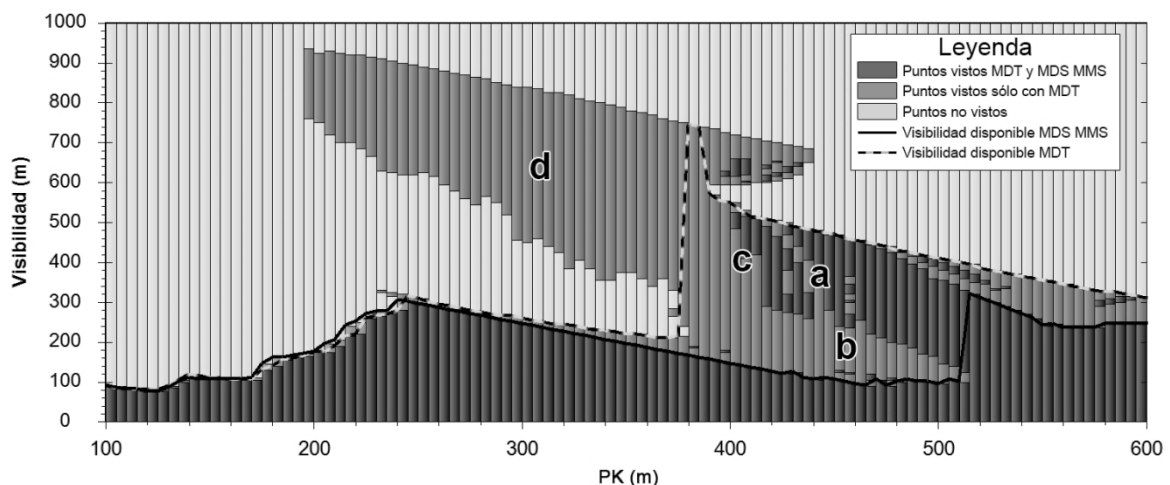


Fig. 7 - Comparación de los diagramas de visibilidad obtenidos con MDT y MDS MMS en la carretera M-221

4.3 Influencia de otros elementos de las márgenes

Otros elementos próximos al borde de la carretera, distintos del equipamiento vial y la vegetación, también afectan a la distancia de visibilidad disponible. Muy próximo a una de las márgenes de la carretera M-221 (en el mismo tramo tratado en el apartado anterior), se localiza una finca delimitada por una alambrada (Fig. 6). A la hora de modelar la zona, debido a su elevada resolución y sensibilidad, la toma de datos con el sistema IPS2 reconoció multitud de puntos de la alambrada. Como consecuencia, al construir la triangulación de Delaunay para el MDS MMS se interpreta la alambrada como un muro. Además, la alambrada se encuentra en la margen interior de una curva, con lo que un tramo de carretera, que es visto en la realidad (Fig. 6), aparece como no visto en el resultado del cálculo (Fig. 7). En la Figura 6, se ha resaltado el tramo de carretera manifiestamente visible a través de la alambrada. A partir del PK 400 de la Figura 7, es donde comienza a observarse un tramo de calzada alejado (área señalada por la letra *c* de la Figura 7). Ese tramo de calzada, que sólo es visible tras otro tramo oculto después de rebasar la zona junto a la alambrada, en la realidad es visible mucho antes a través de esa alambrada. Este hecho se comprueba si se realiza el análisis del mismo tramo utilizando el MDT (representado por el sombreado gris medio indicado por la letra *d* en la Figura 7).

Por otra parte, la línea eléctrica aérea que se observa en la Figura 6 también fue detectada por el equipo dotado de tecnología IPS2. Dado que se hubiese creado un muro en la triangulación del modelo que obstruiría la carretera, los puntos capturados con la elevación del cable debieron ser procesados y eliminados.

5. CONCLUSIONES

Se ha analizado la influencia de los elementos de las márgenes de una carretera sobre la distancia de visibilidad disponible en función del tipo de MDE utilizado, poniendo de manifiesto las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Cuando la carretera analizada discurre por un tramo recto, resulta más simple el uso de MDT, no sólo porque los resultados son idénticos sino también es debido a que no hay que procesar los puntos para eliminar ruidos, resultando suficientemente fidedignos si no hay árboles u otros elementos volando sobre la calzada que puedan influir en la visibilidad. Sin embargo, donde el trazado en planta deja de ser recto y las visuales a trazar entre observador y obstáculo dejan de proyectarse sobre la calzada, la diferencia entre los modelos estudiados se hace patente. Es en este caso donde se obtienen unos resultados más próximos a la realidad si se emplea alguno de los diversos tipos de MDS. Así, se desaconseja el empleo de MDT en tramos donde el trazado sea muy sinuoso en planta y exista abundante vegetación u otros elementos muy perceptibles en las márgenes. En general, los MDS resultan más adecuados para estudiar la visibilidad disponible y la coordinación tridimensional trazado debido a que los resultados obtenidos con estos modelos se asemejan más a la realidad observable. En el caso particular de los MDS obtenidos con LIDAR aéreo, al no considerar elementos verticales, el estudio de la visibilidad requiere un

menor pretratamiento de los datos y el análisis de resultados es más sencillo. Por contra, su análisis entraña mayor dificultad debido a la imposibilidad de representar la superficie del entorno de la carretera con las limitaciones de la triangulación de Delaunay.

El MDS MMS permite una precisión máxima en comparación con los otros modelos procedentes de LIDAR aéreo, ya que reproduce la carretera y su entorno de manera mucho más fidedigna. Sin embargo, la gran sensibilidad del IPS2, al considerar absolutamente todos los ruidos que generan los elementos de las márgenes, por pequeños que sean, genera inconvenientes importantes tanto en el preproceso del modelo como de cara al estudio de fenómenos relacionados con la coordinación del trazado. El uso de estos modelos requiere un análisis mucho más exhaustivo que discrimine si la causa de una distancia de visibilidad insuficiente es la geometría de la carretera y el relieve (taludes), o por el contrario se debe a un elemento próximo a las márgenes de la carretera. Se recomienda el uso de modelos procedentes de MDS MMS para estudiar las condiciones de visibilidad reales con mayor precisión en casos muy concretos, en ausencia de elementos que impliquen algunos de los problemas inherentes a la utilización de triangulaciones de Delaunay que se han explicado. En estos modelos se ha comprobado la influencia de algunas dotaciones viarias como las barreras de seguridad metálicas. Aunque en este caso particular, el resultado es muy sensible a parámetros a fijar, como la altura del obstáculo a visualizar. Igualmente, es muy recomendable conocer la existencia de elementos que puedan llevar a resultados engañosos, como alambradas, para interpretar los resultados.

Es necesario mejorar las técnicas existentes o desarrollar nuevas técnicas capaces de solventar los inconvenientes mencionados para poder explotar el potencial de los MDS MMS en el estudio de la distancia de visibilidad disponible, de modo que permitan estudiar la visibilidad de forma realista también en tramos donde existan elementos que “vuelan” sobre la calzada, pasos superiores o incluso túneles.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Economía y Competitividad, por la financiación del proyecto de investigación TRA2011-25479 (Convocatoria de 2011 de Proyectos de Investigación Fundamental no Orientada del Plan Nacional de I+D+I 2008-2011).

REFERENCIAS

ALTAMIRA, A. L., MARCET, J. E., GRAFFIGNA, A. B., y GÓMEZ, A. M. (2010). Assessing available sight distance: an indirect tool to evaluate geometric design consistency. *Proc., 4th International Symposium on Highway Geometric Design, 2-5 June 2010*. Transportation Research Board, Valencia.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). (2004). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. 5th edition. Washington, DC: AASHTO.

ANDUEZA, P.J. (2000). Mathematical models of vehicular speed on mountain roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1701(1), pp. 104-110.

CALIENDO, C., GUIDA, M. y PARISI, A. (2007). A crash-prediction model for multilane roads. *Accident Analysis & Prevention*, 39(4), pp. 657-670.

CASTRO, M., IGLESIAS, L., SÁNCHEZ, J.A. y AMBROSIO, L. (2011). Sight distance analysis of highways using GIS tools. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(6), pp. 997-1005.

CASTRO, M. (2012). Highway design software as support of a project based learning course. *Computer Applications in Engineering Education*, 20(3), pp. 468-473.

CASTRO, M., ANTA, J.A., IGLESIAS, L. y SÁNCHEZ, J.A. (2013). GIS-Based System for Sight Distance Analysis of Highways. *Journal of Computing in Civil Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000317.

DE SANTOS BERBEL, C., ANTA, J. A., CASTRO, M., y PARÉNS GONZÁLEZ, M. (2013). La distancia de visibilidad en carreteras como herramienta para evaluar la seguridad vial: aplicación práctica. *Conferencia Esri España 2013*, 2-3 octubre 2013, Madrid.

ESRI (2008). "About TIN surfaces"

<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=About_TIN_surfaces>
(Accedido el 9 de enero de 2014)

FAMBRO, D.B., FITZPATRICK, K. y KOPPA, R.J. (1997). *Determination of stopping sight distances*. 400. Washington, DC: Transportation Research Board.

FINK, K.L. y KRAMMES, R.A. (1995). Tangent length and sight distance effects on accident rates at horizontal curves on rural two-lane highways. *Transportation Research Record*, (1500), pp. 162-168.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV). (2008). *Hinweise zur Visualisierung von Entwürfen für außerörtliche Straßen (H ViSt)*. Bonn: FGSV-Verlag.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV). (2012). *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL)*. Bonn: FGSV-Verlag.

GEORGE, P.L. y BOROUCHAKI, H. (1998). *Delaunay triangulation and meshing: application to finite elements*. París: Hermes.

HANUSCH, T. (2010). *Texture mapping and true orthophoto generation of 3D objects*. Tesis doctoral, ETH Zürich.

HASSAN, Y., EASA, S.M. y ABD EL HALIM, A.O. (1997). Design considerations for combined highway alignments. *Journal of Transportation Engineering*, 123(1), pp. 60-68.

JHA, M.K., KARRI, G.A.K., y KÜHN, W. (2011). New three-dimensional highway design methodology for sight distance measurement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2262, pp. 74-82.

KHATTAK, A.J. y SHAMAYLEH, H. (2005). Highway safety assessment through geographic information system-based data visualization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 19(4), pp. 407-411.

KIDNER, D.B., SPARKES, A.J., DOREY, M.I., WARE, J.M. y JONES, C.B. (2001). Visibility analysis with the multiscale implicit TIN. *Transactions in GIS*, 5(1), pp. 19-37.

KÜHN, W., VOLKER, H. y KUBIK, R. (2011). Workplace simulator for geometric design of rural roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2241, pp. 109-117.

ISMAIL, K. y SAYED, T. (2007). New algorithm for calculating 3D available sight distance. *Journal of Transportation Engineering*, 133(10), pp. 572-581.

LAROCCA, A. P., DA CRUZ FIGUEIRA, A., QUINTANILHA, J. A., y KABBACH Jr, F. I. (2011). First steps towards the evaluation of the efficiency of three-dimensional visualization tools for detecting shortcomings in alignment's coordination. *Proc. 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, 14-16 September 2011*. Transportation Research Board, Indianapolis, Indiana.

MINISTERIO DE FOMENTO (2000). *Norma 3.1-IC: Trazado*. Madrid.

MINISTERIO DE FOMENTO (2010). "Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento. Plan Nacional de Ortofotografía Aérea", <<http://www.ign.es/PNOA/>> (Accedido el 18 de noviembre de 2013).

OLSON, P.L., CLEVELAND, D.E., FANCHER, P.S., KOSTYNIUK, L.P. y SCHNEIDER, L.W. (1984). *Parameters affecting stopping sight distance*. Washington,

DC: National Cooperative Highway Research Program Report 270, National Research Council.

ROOS, R. y ZIMMERMANN, M., (2004). Quantitative methods for the evaluation of spatial alignment of roads, *Atti del convegno Società Italiana di Infrastrutture Viarie*, SIIV. 27-29 octubre 2004, Florencia.

SPARKS, W.J. (1968). The influence of highway characteristics on accident rates. *Public Works*, 99(3), pp. 101-103.

SYLIANOV, V.V. (1973). Comparison of the pattern of accident rates on roads on different countries. *Traffic Engineering and Control*, 14, pp. 432-435.

TOPCON (2007). "GR-3 GNSS receiver specifications".

<http://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/gr-3_e.pdf> (Accedido el 19 de enero de 2013).

URBANIK II, T., HINSHAW, W. y FAMBRO, D.B. (1989). Safety effects of limited sight distance on crest vertical curves. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1208, pp. 23-35.